第48卷 第2期
2025年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 2
Feb. 2025

基于SD模型的巴彦淖尔市水资源供需平衡方案研究

王平顺[1,2]， 臧旭超[3]， 厚富来[1,2]， 田国良[1,2]， 李 璐[1,2]，
韩学敏[1,2]， 董少刚[1,2]

（1. 内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古 呼和浩特 010021；2. 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010021；3. 内蒙古第一水文地质工程地质勘查有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010021）

摘 要：随着社会经济的发展，越来越多的城市水资源供需矛盾日益突出，探求城市水资源供需平衡以实现经济的可持续发展已经成为当下城市发展规划过程中的重要议题。结合当地社会发展现状，运用系统动力学的方法设计出稳态均衡型、经济增长型、高效利用型和综合协调型4种水资源供需平衡方案，分析了2016—2035年巴彦淖尔市水资源供需状况。模拟结果表明：（1）巴彦淖尔市若采取稳态均衡型和经济增长型方案，预计在2018—2027年将面临水资源供应无法满足需求的风险。（2）采用高效利用型和综合协调型方案却能够有效改善这一状况。（3）综合协调型方案不仅有利于当地经济的发展，还有效降低了农业、第二产业和第三产业需水量，极大缓解了水资源供需压力，可作为当地水资源未来开发利用的优选方案。

关 键 词：系统动力学；水资源供需；水均衡；巴彦淖尔市

文章编号：1000－6060(2025)02－0202－10(0202～0211)

中国虽然拥有约2.8×10^{12} $m^3\cdot a^{-1}$的水资源总量，但却面临着人均水资源量低下、水资源时空分布不均、水体污染事件频发，节水省水效率难以提升等诸多问题[1-2]。除此之外，水资源严重短缺[3]、浪费严重[4]、管理体制不完善[5]，以及水土资源流失[6]都严重制约了当今社会与经济的健康发展。其中，水资源供需矛盾的不断加剧最为突出，探求合理可控的水资源供需平衡关系已经成为当下水资源管理规划的主要目标[7-9]。进行区域水资源供需平衡研究，有助于国家与政府针对性地制定区域发展规划，从而达成水资源合理分配的最优解，可进一步维持当地社会经济发展的活力。

系统动力学（System dynamics，SD）是Forrester J W教授在1958年为分析生产管理及库存管理等企业问题而提出的系统模拟方法[10]。它是通过运用逻辑分析与数值计算的方法，将各个变量定性且定量的相互关联起来，并不断深入挖掘确定出变量与变量之间的因果关系。目前，国内外学者在研究城市水资源供需平衡时运用了多种不同的方法，如改进熵权法[11]、TOPSIS法[12]、AHP法[13]、系统动力学模型法等。而系统动力学模型法凭借其可以快速高效地处理复杂系统结构中的非线性与高阶方程运算，以及能够给出变量之间影响变化的反馈信息等特点[14-15]，现不仅在社会学[16]、经济学[17-18]、环境学[19-20]、农业生态学[21]等领域大放光彩，还在城市规划[22]、政策制定[23]，以及水资源管理方面[24]都有所应用。例如，赵璧奎等[25]在解决城市干旱问题上构建了汕尾市公平水库供水片区的系统动力学模型，实现了区域干旱情景的模拟和对应措施的效果检验。卢方园等[26]在研究库布齐沙漠的社会经济系统时，分析了1999—2019年的社会经济与水资源使用现状，并建立了多种优化模型用于模拟当地未来水资源的使用状况。陈文娟等[27]根据天津市2012—2019年的水资源供需情况和社会发展状况，

收稿日期：2024-04-12； **修订日期：**2024-06-28
基金项目：内蒙古自治区驻点城市生态环境保护治理攻坚“一市一策”综合解决方案项目基金(2022-YRUC-01-050205-01)资助
作者简介：王平顺(2000-)，男，硕士研究生，主要从事生态水文地质研究. E-mail: yuuwps@163.com
通讯作者：董少刚(1975-)，男，教授，主要从事生态水文地质研究. E-mail: groundwater@163.com

构建了符合当地水资源可持续发展的系统动力学模型，提出了4种相应的优化配置方案来保障城市水资源系统的可持续发展。

巴彦淖尔市拥有复杂的地质构造和多变的水资源总量，根据统计资料可知，巴彦淖尔市在2016—2022年期间，年均水资源总量变化值最小的是从2020年的56.499×10⁸ m³下降至2021年的55.862×10⁸ m³，而变化值最大的是从2017年的50.519×10⁸ m³提高至2018年的55.504×10⁸ m³。巴彦淖尔市在2016—2022年期间水资源总量平均为53.458×10⁸ m³，其中，地表水和地下水总量分别为47.135×10⁸ m³和20.928×10⁸ m³，重复计算水量为14.605×10⁸ m³。然而，该市人均水资源占有量仅为600 m³，约为全国人均量的30%[28]。巴彦淖尔市的水资源状况不仅面临着严重的结构型短缺问题，而且还给该地区水资源可持续利用带来了挑战。为了确保当地水资源的长期供需平衡，现在根据当地目前经济发展状况，运用Vensim软件构建符合巴彦淖尔市水资源供需平衡的系统动力学模型。随后采用情景分析的方法来对巴彦淖尔市社会经济发展进程中潜在的水资源问题进行分析，并在此基础上，对各种情景方案下的水资源供需平衡状态进行系统评价，本研究对巴彦淖尔市实现经济与水资源协同可持续发展均具有重要的意义。

1　研究区概况

巴彦淖尔市位于中国内蒙古自治区的西部(40°13′~42°28′N，105°12′~109°53′E)，其总面积约为6.51×10⁴ km²。巴彦淖尔市位于温带大陆性季风气候区域，四季分明，年平均气温维持在5 ℃左右。该地区的光照资源丰富，储热量高，但干燥少雨，蒸发量大，年均降水量为188 mm。统计截止至2022年底，该市水土流失问题十分严重，全市水土流失面积达到46770.56 km²。全市总人口数量为151.76×10⁴人，城镇化率为60.89%。2022年底全市GDP总量达1084.55×10⁸元，按可比价格计算，同比增长2.1%。

2　系统动力学模型的构建

2.1　模型边界的确定

本次系统动力学模型的范围边界为整个巴彦淖尔市，模拟的时间范围是2016—2035年。在本模型中，将2016年设定为模拟基准年，2035年为模拟截止年，模拟的时间步长设为1 a。选择2022年为现状年，则2016—2022年期间是数据的收集时间段，2023—2035年为数据的预测时间段。选取离现状年最近的3 a(即2020—2022年)为模型历史数据检验时间段。

2.2　模型的构建

巴彦淖尔市水资源供需平衡SD模型主要是由供水和需水2个主系统所组成，而主系统又受到各子系统的相互影响与作用(图1)。供水主系统主要由地下水供水量、地表水供水量、蓄水工程供水量、城市中水量和第二产业重复用水共5个子系统所组成。其中，地下水供水量是由地下水资源量和地下水利用率组成；地表水供水量是由地表水资源量和地表水利用率组成；城市中水量是由污水处理率、城镇生活污水排放量、第二产业污水排放量等组成；第二产业重复用水是由第二产业需水量和第二产业用水重复率组成。需水主系统是由农业需水量、生态需水量、生活需水量、第二产业需水量和第三产业需水量共5个子系统所组成。其中，农业需水量是由渔业需水量、灌溉需水量和畜牧需水量组成；生态需水量是由生态用水变化率和生态用水变化量组成；生活需水量是由城镇居民生活需水量和农村居民生活需水量组成；第二产业需水量是由第二产业产值和单位第二产业GDP需水量组成；第三产业需水量是由第三产业产值和单位第三产业GDP需水量组成。最终，由各个子系统中的变量之间通过彼此定量定性的方式相互构建成一个复杂的整体，构建的SD模型如图2所示。

2.3　数据来源与模型方程

本次研究所使用的数据取自于《巴彦淖尔市年鉴统计(2017—2023年)》《巴彦淖尔市水资源公告(2016—2022年)》《内蒙古自治区水土保持公告(2017—2022年)》《巴彦淖尔市“十四五”水安全保障规划》《巴彦淖尔市国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《巴彦淖尔市“十四五”应对气候变化规划》《巴彦淖尔市湿地保护规划(2023—2030年)》和《内蒙古自治区行业用水定额(DB15/T 385-2020)》。除此之外，有少量变量值是由多个初始值经过简单的运算统计后所得。

虽然本模型所涉及的变量较多，但是由于各变

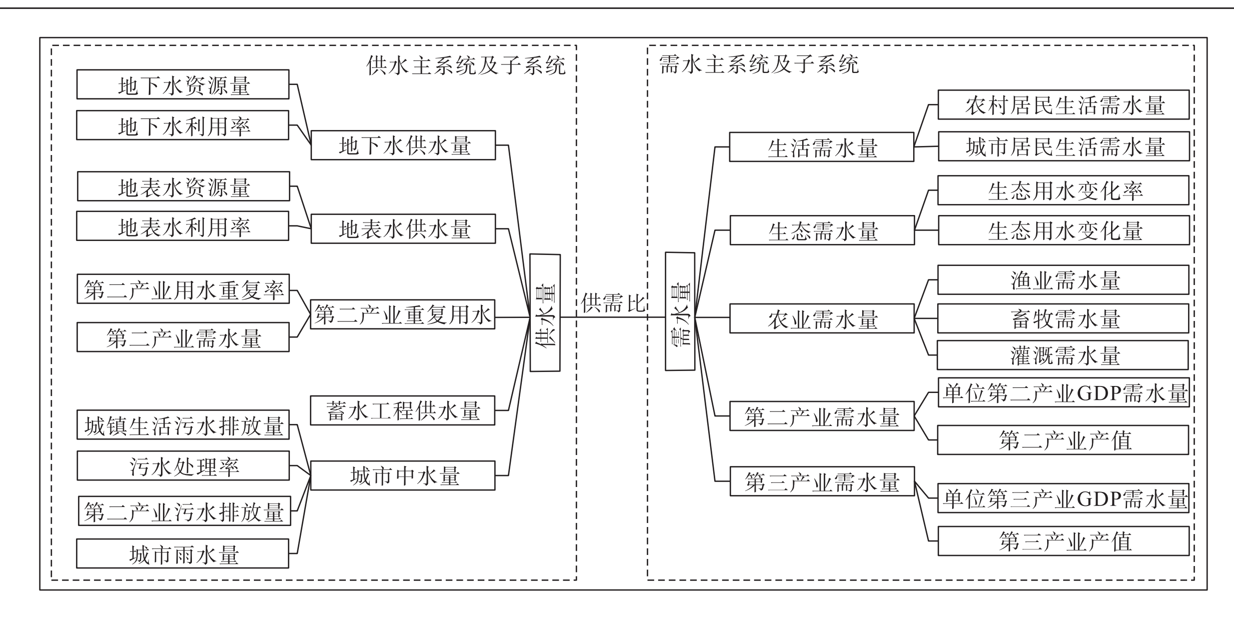


图1 供、需水主系统及子系统

Fig. 1 Water supply and demand main system and subsystems

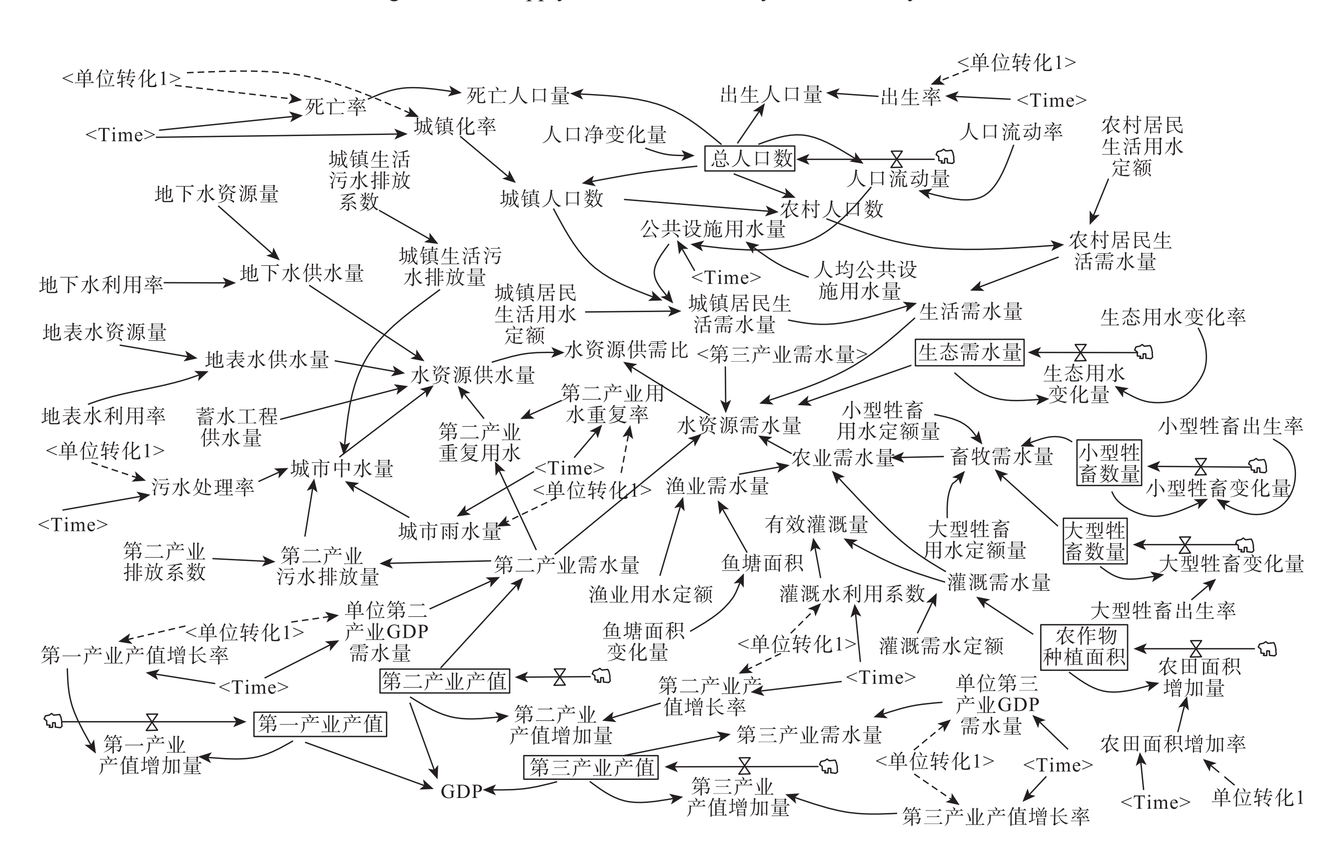


图2 巴彦淖尔市水资源供需平衡SD模型

Fig. 2 SD model of water resources supply and demand balance in Bayannur City

量之间的关系较为明确且简单，因此在本文中仅列出以下关键变量的计算方程如下所示：

（1）水资源供需比=水资源供水量÷水资源需水量

（2）农业需水量=灌溉需水量+畜牧需水量+渔业需水量

（3）第二产业需水量=单位第二产业GDP需水量×第二产业产值

（4）第三产业需水量=单位第三产业GDP需水量×第三产业产值

2.4 模型检验

运用Vensim软件自带的"Units Check"单位一致性检验模块可以快速对模型的单位一致性进行检查。由于模型中的变量单位相互独立，并且软件无法进行等式左右单位不同的变量逻辑计算，因此需要先全部进行单位统一化操作。然而，部分变量在使用时间隐函数变量(<Time>)时会多出一个时间单位"Year"，可以通过添加单位为"fraction/Year"、函数值为1的"<单位转化1>"来消除时间隐函数中单位不一致的问题。本模型在进行"Units Check"单位一致性检验模块的检验后，模型单位最后已全部统一化。

相对误差的绝对值检验(ARE)可以用来验证模拟结果与现实数据之间是否具有一致性。若ARE的计算结果小于10%，则说明其处于允许误差范围之内，即表明模型的模拟结果与历史结果接近，则模型可用于后续的情景分析和预测。本次模型选择与当下发展状况最为接近的3 a (2020—2022年)作为历史检验年来进行模拟。表1中列出了巴彦淖尔市水资源供需平衡模型一些主要变量的模拟结果。下式为ARE计算公式：

$$\mathrm{ARE}=\left|\frac{Y'_t-Y_t}{Y_t}\right|\times 100\% \tag{1}$$

式中：Y'_t 为第 t 年的模拟数据；Y_t 为第 t 年的历史数据。

从表1中可以得知，主要变量的ARE结果全部符合要求，表明所构建的模型基本能够反映现实情况，因此可以用于后续年份的模拟。

2.5 敏感性分析

敏感性分析是水资源管理中的重要工具，它可以帮助理解并初步预测不同变量变化对水资源供需比的影响程度，从而为寻找影响水资源供需比的关键因素提供方向[29]。在进行敏感性分析时，每次仅调整一个变量值，其余变量均保持不变。本模型依据巴彦淖尔市自身特点共选取9项变量，发现该9项变量的调整均会对模型结果产生不同程度的影响，因此可以用于后续的方案设计[30]。敏感性计算公式如下[31]：

$$\mathrm{SA}=\frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \tag{2}$$

式中：SA为变量敏感性；ΔY_i 为变量 i 的供需比变化量；ΔX_i 为变量 i 的变化范围量。由前文"2.3数据来源与模型方程"一节中提及的各个文件统计结果，关于9项变量的基准年变量值、变化范围的统计结果以及对应变量的敏感性计算结果已全部汇总在表2当中。

表1　2020—2022年巴彦淖尔市主要变量模拟结果汇总

Tab. 1　Summary of simulation results of main variables in Bayannur City from 2020 to 2022

变量		2020年	2021年	2022年
GDP	实际值/10^8元	869.620	1015.230	1084.55
	模拟值/10^8元	931.186	995.541	1065.430
	ARE误差/%	7.08	1.94	1.76
农业需水量	实际值/10^8 m^3	47.901	48.840	48.500
	模拟值/10^8 m^3	47.965	48.227	48.301
	ARE误差/%	0.13	1.26	0.41
总人口数	实际值/10^8人	0.0150	0.0150	0.0152
	模拟值/10^8人	0.0167	0.0166	0.0164
	ARE误差/%	8.28	8.41	8.37
第二产业需水量	实际值/10^8 m^3	0.641	0.689	0.600
	模拟值/10^8 m^3	0.682	0.661	0.648
	ARE误差/%	6.39	4.04	7.98
供水量	实际值/10^8 m^3	56.499	55.864	51.310
	模拟值/10^8 m^3	52.499	52.502	52.509
	ARE误差/%	7.08	6.02	2.34
需水量	实际值/10^8 m^3	49.890	49.790	49.780
	模拟值/10^8 m^3	54.281	54.537	54.616
	ARE误差/%	8.80	9.53	9.71

注：ARE为相对误差的绝对值检验。

表2 变量敏感性分析结果统计表

Tab. 2 Statistical table of variable sensitivity analysis results

指标名称	基准年变量值	变量变化范围	基准年供需比	2035年供需比	SA
第二产业产值增长率	2.689%	0%~6.972%	1.04953	1.12010	1.012
第三产业产值增长率	12.572%	−15.788%~0%	1.04953	1.12006	−0.447
单位第二产业GDP需水量	3.76×10^{-3} m^3·元$^{-1}$	-2.816×10^{-3}~0 m^3·元$^{-1}$	1.04974	1.12002	−24.958
单位第三产业GDP需水量	8.045×10^{-4} m^3·元$^{-1}$	-7.364×10^{-4}~0 m^3·元$^{-1}$	1.04984	1.12006	−88.037
农村居民生活用水定额	19 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}	−1~0 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}	1.04970	1.12016	−0.070
城市居民生活用水定额	21 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}	−1~0 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}	1.04971	1.12022	−0.071
大型牲畜用水定额	21.9 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}	−1.095~0 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}	1.04959	1.12099	−0.065
小型牲畜用水定额	2.01 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}	−0.103~0 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}	1.04969	1.12038	−0.687
灌溉需水定额	6.0×10^{7} m^3·hm^{-2}·a^{-1}	-3.0×10^{4}~0 m^3·hm^{-2}·a^{-1}	1.09701	1.16873	−35.860

注:SA为变量敏感性。

敏感性为正数,则表明提高变量值会使得水资源供需比提高;相反,敏感性为负数时,提高变量值会使得水资源供需比降低。同时,变量的敏感性绝对值越大表明该项变量的调整对水资源供需比的影响越大。由表2的敏感性分析结果可知,以上指标变化均对巴彦淖尔市水资源供需平衡产生了不同的影响。其中,单位第二、三产业GDP需水量敏感性较大,分别为−24.958、−88.037,分析可知到2035年时单位第二、三产业GDP需水量降低至9.44×10^{-4} m^3·元$^{-1}$、0.681×10^{-4} m^3·元$^{-1}$,相比于2016年分别下降了74.9%和91.5%,这降低了该市第二、三产业用水量,进而降低了水资源的需求量并使得水资源供需比提高。灌溉需水定额较为敏感,敏感性为−35.860,由于巴彦淖尔市是一个以农业为主的城市,农业经济是当地经济发展的重要支柱部分,农业需水量占全市总需水量的85%,因此降低当地灌溉需水定额会大幅度降低农业需水量,使得水资源需求量降低,水资源供需比提高。除上述指标之外,其余指标的敏感性较小。

3 结果与分析

3.1 方案介绍

综合考虑巴彦淖尔市未来社会经济的发展之后,本次方案选取了稳态均衡型、经济增长型、高效利用型和综合协调型共4种方案。依据控制变量的原则,每一种方案针对巴彦淖尔市水资源供需发展状况进行了不同的变量设定。同时,变量的设定是参考各个变量的统计源文件和通过表2的敏感性分析二者共同决定。以下是方案一至方案四的方案介绍:

方案一:稳态均衡型。稳态均衡型是延续现状政策的发展,不对任何变量的数值进行调整。

方案二:经济增长型。由稳态均衡型可知,在不对任何变量的数值进行调整下2025年之前第三产业产值增长率为正,在2025年后由正转负。经济增长型是在稳态均衡型的基础之上,将供水主系统中的第二产业产值增长率每年提升8%,第三产业产值增长率在2025年前每年提升15%,2025年后每年减少15%,其余变量与方案一中保持一致。

方案三:高效利用型。高效利用型是在稳态均衡型的基础之上,将供水主系统中的单位第二产业GDP需水量每年降低6%和单位第三产业GDP需水量每年降低6%,将需水主系统中的城市居民生活用水定额下降至20 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}、农村居民生活用水定额下降至18 m^3·人$^{-1}$·a^{-1}、大型牲畜用水定额下降至20.805 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}、小型牲畜用水定额下降至1.907 m^3·只$^{-1}$·a^{-1}、灌溉需水定额下降5%,其余变量与方案一中保持一致。

方案四:综合协调型。综合协调型是在稳态均衡型的基础之上,综合使用了方案二和方案三所进行调整的全部变量,未调整的变量与方案一中保持不变。

3.2 方案分析

模拟结果显示,方案三和方案四的农业需水量明显低于方案一(图3)。在需水量最高的2022年,方案三和方案四相比于方案一能够节省约2.4×10^{8} m^3的农业需水量,到2035年,方案三和方案四要低于方案一约2.0×10^{8} m^3的农业需水资源量。然

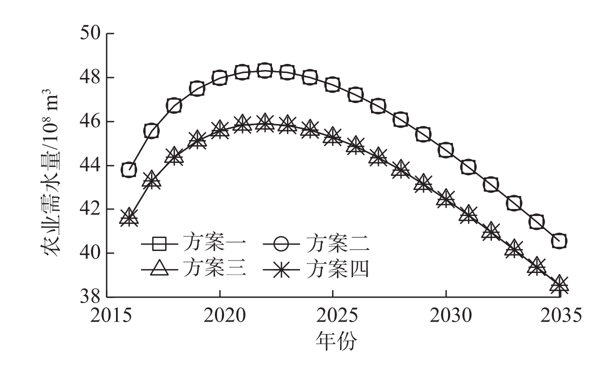


图3　农业需水量模拟结果

Fig. 3　Simulation results of agricultural water demand

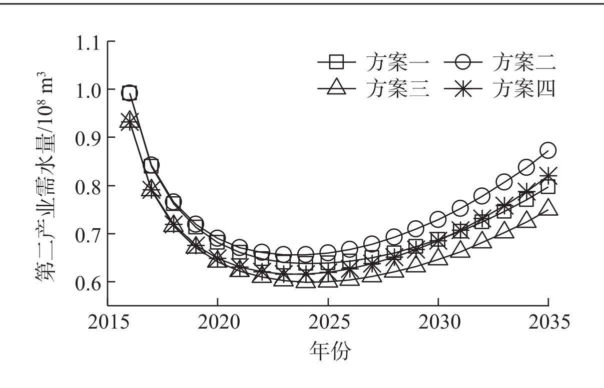


图4　第二产业需水量模拟结果

Fig. 4　Simulation results of water demand in the secondary industry

而，方案二通过调整变量改变了第二、三产业产值增长率并未对农业需水量造成太大的影响，因此方案二的农业需水量与方案一中的基本保持一致。综上所述，通过合理地降低大、小型牲畜用水定额和灌溉需水定额能够有效地降低农业水资源需求压力。

巴彦淖尔市第二产业需水量预测结果如图4所示。其中，方案二的第二产业需水量模拟结果要高于方案一。是由于在方案二的设定中将第二产业产值增长率每年提高8%，因此依次导致了第二产业产值增加量和第二产业产值的提高，另外在保持单位第二产业GDP需水量不变的情况下，使得第二产业需水量平均提高了4%。方案三的模拟结果要明显低于方案一。在2035年通过降低单位第二产业GDP需水量使得第二产业需水量要低于方案一约4.8×10^6 m³，因此降低单位第二产业GDP需水量可以有效降低第二产业需水量。值得注意的是方案四在2030年之前要低于方案一，2030年之后又超过方案一，是由于方案四的设定中既包含对第二产业产值的提高，又包含了对单位第二产业GDP需水量的降低。具体来说，在2030年之前，降低单位第二产业GDP需水量对第二产业需水量降低的平均影响为6%，提高第二产业产值对第二产业需水量提高的平均影响为2%，相反在2030年后，提高第二产业产值对提高第二产业需水量的平均影响为4%，其超过了降低单位第二产业GDP需水量平均影响的2%。综上所述，提高第二产业产值增长率会提高第二产业产值，但不会使第二产业需水量减少，然而降低第二产业GDP需水量可以使第二产业需水量减少。

各个方案的第三产业需水量模拟结果如图5所示。方案二的模拟结果普遍高于方案一，方案三的模拟结果要普遍低于方案一，方案四的模拟结果在2021年之前要低于方案一，但在2021年之后又高于方案一。具体分析可知在方案二中，将第三产业产值增长率综合提高后，会进一步提高第三产业产值增加量，从而使第三产业产值提升，另外在单位第三产业GDP需水量不变的情况下，最终表现为第三产业需水量的上升。方案三中将单位第三产业GDP需水量降低后，在第三产业产值不变的情况下第三产业需水量相比于方案一有所降低。方案四综合了方案二和方案三中提高第三产业产值增长率和降低单位第三产业GDP需水量的变量调整。在2021年之前，降低单位第三产业GDP需水量对第三产业需水量降低的平均影响为6%，提高第三产业产值对第三产业需水量提高的平均影响为3%。在2021年以后，降低单位第三产业GDP需水量对第三产业需水量降低的平均影响依然为6%，但是提高第三产业产值对第三产业需水量提高的平均影

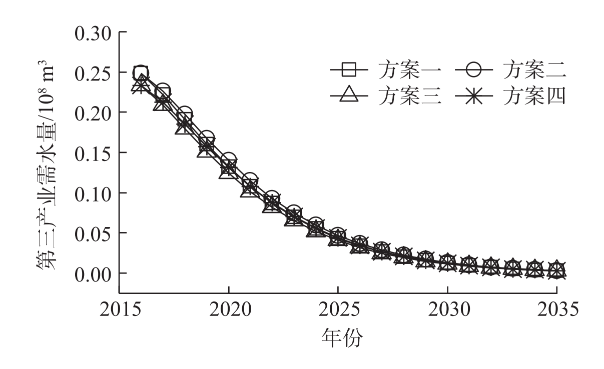


图5　第三产业需水量模拟结果

Fig. 5　Simulation results of water demand in the tertiary industry

响为7%。因此,出现了方案四相比于方案一在2021年前后第三产业需水量先低后高的情况。综上所述,提高第三产业产值增长率和减缓第三产业产值降低率会提高第三产业产值,并会使得第三产业需水量增加,然而降低单位第三产业GDP需水量可以使第三产业需水量减少。

通过观察水资源供需比可以直接判断巴彦淖尔市水资源匮乏与盈余状况,4种方案模拟的结果如图6所示。其中,方案一是在不作出任何变动调整的状况下,2018—2027年之间水资源供需比小于1,最低值达0.966,在此期间水资源的缺乏会让该城市的各项发展面临着严峻的挑战。方案二的调整对水资源供需比的影响幅度较小,即使对第二产业需水量和第三产业需水量进行了调整,也未能解决2018—2027年之间水资源供不应求的问题,因此第二、三产业需水量并非关键水资源供需调整对象。方案三的水资源供需比全部大于1,该方案模拟的最低值为1.011,因此通过降低单位第二产业GDP需水量、单位第三产业GDP需水量、居民生活用水定额、牲畜用水定额和灌溉用水定额可以有效地缓解巴彦淖尔市水资源供需矛盾。方案四在综合了方案二和方案三变量调整的基础之上,同样实现了全模拟年段水资源供需比大于1的目标。由此可知,通过提高单位第二、三产业GDP用水量效率和降低各用水定额量可以有效实现城市水资源的高效利用。

4 讨论

本文结合巴彦淖尔市水资源开发利用的实际情况仅列出了4种促进该市水资源可持续利用的方案,还可以通过人口增长、污水治理、科技发展等其他角度来改变对应变量,从而考虑水资源供需平衡分析中的变化。同时受限于资料缺失的问题,模型结构仍需要不断完善,所构建的巴彦淖尔市水资源供需平衡SD模型除了该模型所含变量之外,还存有其他水资源数据需纳入补充。除此之外,随着模拟时间的逐渐拉长,拟合数据与现实数据会逐渐出现偏差,届时构建的模型方程已不再适用,仍需在未来重新拟合方程并进行验证。

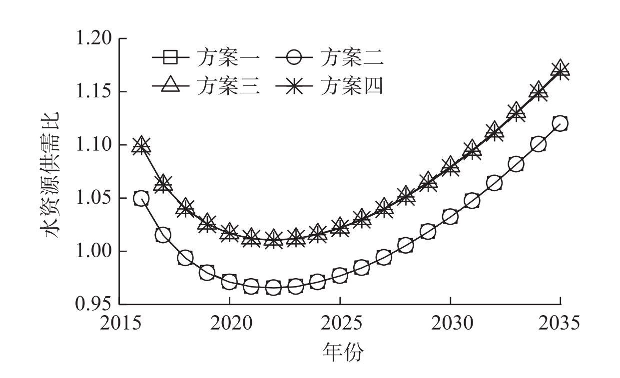


图6 水资源供需比模拟结果

Fig. 6 Simulation results of water resources supply and demand ratio

至预测截止年2035年内,巴彦淖尔市将会面临着严重的水资源供需冲突问题。通过比较前文所述的4种方案可知,稳态均衡型方案已不再适应未来该市的发展,10 a之久的水资源供不应求问题仍等待解决。经济增长型方案虽然对该市经济增长有所帮助,但是仍未缩短长达10 a水资源供需不平衡问题。高效利用型方案有助于该市实现水资源的高效利用,在保障第二产业和第三产业发展的前提之下,通过多方面的调整有效地降低了农业用水总量,缓减了该市水资源供给压力。综合协调型方案在综合了各个方案的优缺点之后,既促进了经济的发展,又满足了供需比大于1的要求。综上所述,方案四的综合协调型可作为2035年内巴彦淖尔市水资源未来发展参考的优选方案。

5 结论

本文运用系统动力学的方法构建了巴彦淖尔市水资源供需平衡模型,针对巴彦淖尔市发展状况和水资源利用现状共设计4种水资源供需方案用于该市水资源未来发展状况的模拟。主要结论如下:

(1) 巴彦淖尔市若按照稳态均衡型的发展模式,预计在2018—2027年将面临严重的水资源短缺问题,对经济社会的健康发展构成了严峻挑战。为缓解这一问题,在稳态均衡型的方案基础上按照经济增长型的方案来进行调整,则发现单纯的提升第二、第三产业产值增长率将还未能够解决水资源供需之间的矛盾。

(2) 高效利用型方案的发展模式侧重于通过综合调整不同部门的用水定额,包括单位第二、三产业GDP需水量、居民生活用水定额、牲畜用水定额和灌溉需水定额。若巴彦淖尔市采取该方案可实

现水资源的节约与高效利用,能够有效解决了水资源不足的问题。

(3)综合协调型方案综合了稳态均衡型、经济增长型和高效利用型3种方案的变量调整策略,并结合了3种方案的特点。模拟结果显示该方案不仅会促进该市经济的发展,还确保了供需比大于1的要求。通过合理地降低大、小型牲畜用水定额和灌溉需水定额能够有效地降低农业水资源需求压力。提高第二产业产值增长率会提高第二产业产值,但不会使第二产业需水量减少,然而降低单位第二产业GDP需水量可以使第二产业需水量减少。提高第三产业产值增长率和减缓第三产业产值降低率会提高第三产业产值,并会使得第三产业需水量增加,然而降低单位第三产业GDP需水量可以使第三产业需水量减少。因此,综合协调型方案被认为是当地水资源未来发展的优选方案,可以为后续新决策提供参考。

参考文献(References)

[1] 何凡, 路培艺, 尹婧, 等. 中国水资源空间均衡评价与空间关联性分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 148-155. [He Fan, Lu Peiyi, Yin Jing, et al. Spatial equilibrium evaluation and spatial correlation analysis of water resources in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 148-155.]

[2] 李可柏, 陶军, 卢慧. 中国水资源利用效率及影响因素研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43(1): 11-23. [Li Kebai, Tao Jun, Lu Hui. Study on water resources utilization efficiency and its influencing factors in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(1): 11-23.]

[3] 侯立安, 徐祖信, 尹海龙, 等. 我国水污染防治法综合评估研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 126-136. [Hou Li'an, Xu Zuxin, Yin Hailong, et al. Comprehensive evaluation on China's law on water pollution prevention and control[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 126-136.]

[4] Mannina G, Gulhan H, Ni B J. Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector[J]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127951, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127951.

[5] Dinar A. Challenges to water resource management: The role of economic and modeling approaches[J]. Water, 2024, 16(4): 610-639.

[6] Wang Z, Luo D, Xiong K, et al. Studies on hydrological processes on karst slopes for control of soil and water loss[J]. Sustainability, 2022, 14(10): 5789-5803.

[7] 左其亭, 吴青松, 金君良, 等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 165-173. [Zuo Qiting, Wu Qingsong, Jin Junliang, et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 165-173.]

[8] Wang X, Zhang Z, Liu F, et al. Study on supply-demand balance analysis and service flow of water resources in Dongjiang River Basin[J]. Water, 2022, 14(13): 2060-2074.

[9] Zhu M, Yu H, Yang L, et al. Effects of land consolidation and precipitation changes on the balance of water supply and demand in western Jilin[J]. Water, 2022, 14(20): 3206-3221.

[10] 张波, 虞朝晖, 孙强, 等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(2): 1-4. [Zhang Bo, Yu Zhaohui, Sun Qiang, et al. The introduction to system dynamics and relating software[J]. Environment and Sustainable Development, 2010, 35(2): 1-4.]

[11] 丁月龙, 高腾, 赵春子, 等. 哈长城市群水资源承载力时空格局及耦合协调度[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2023, 62(2): 146-155. [Ding Yuelong, Gao Teng, Zhao Chunzi, et al. The temporal-spatial pattern and coupling coordination degree of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(2): 146-155.]

[12] 李治军, 景安琳, 黄佳俊, 等. 基于熵权TOPSIS模型的晋城市水资源承载力分析[J]. 农业与技术, 2022, 42(18): 94-97. [Li Zhijun, Jing Anlin, Huang Jiajun, et al. Analysis of water resources carrying capacity in Jincheng City based on entropy weight TOPSIS model[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(18): 94-97.]

[13] 杨木易. 基于AHP和改进熵权法的水资源配置与水循环分布合理度的综合评价[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(9): 22-27, 59. [Yang Muyi. Comprehensive evaluation of water resource allocation and rationality of water cycle distribution based on AHP and improved entropy weight method[J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(9): 22-27, 59.]

[14] Zare F, Elsawah S, Bagheri A, et al. Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 27-41.

[15] Zare F, Elsawah S, Iwanaga T, et al. Integrated water assessment and modelling: A bibliometric analysis of trends in the water resource sector[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 765-778.

[16] 张宁, 刘革, 张敬文. 基于系统动力学的我国社会重大风险仿真研究[J]. 财经理论与实践, 2024, 45(1): 104-110. [Zhang Ning, Liu Ge, Zhang Jingwen. Simulation study of major Chinese social risk based on system dynamics[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2024, 45(1): 104-110.]

[17] 陈振, 张康辉, 昝哲. 基于SD模型的突发事件对农产品价格的影响——以2020年新冠肺炎疫情为例[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 237-242. [Chen Zhen, Zhang Kanghui, Zan Zhe. Impact of emergencies on agricultural product price based on SD model: Taking COVID-19 epidemic in 2020 as an example[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(6): 237-242.]

[18] Liu Z, Zhang Q, Liu H. Prediction of municipal solid waste treatment and disposal in high cold and high altitude area based on system dynamics: A case study of Lhasa[J]. Environmental Research Communications, 2023, 5(12): 125006, doi: 10.1088/2515-7620/ad1164.

[19] 王奕淇, 李国平. 基于SD模型的黄河流域生态环境与社会经济发展可持续性模拟[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 901-911. [Wang Yiqi, Li Guoping. Sustainable simulation of ecological environment and socio-economic development in the Yellow River Basin based on the SD model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 901-911.]

[20] 隋露, 闫志明, 李开放, 等. 人类活动及气候变化影响下伊犁河谷生境质量预测研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 104-116. [Sui Lu, Yan Zhiming, Li Kaifang, et al. Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under the influence of human activities and climate change[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 104-116.]

[21] 李瑾, 文琦, 杨骁. 基于资源环境承载力的干旱区乡村振兴路径研究——以宁夏为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 287-297. [Li Jin, Wen Qi, Yang Xiao. Rural revitalization path based on the resources and environment carrying capacity in arid area: A case of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 287-297.]

[22] 罗紫元, 曾坚. 资源环境保护下天津市用地空间增长模拟[J]. 地理研究, 2022, 41(2): 341-357. [Luo Ziyuan, Zeng Jian. Spatial growth simulation of land use in Tianjin from the perspective of resource and environmental protection[J]. Geographical Research, 2022, 41(2): 341-357.]

[23] 刘航, 申格, 杨婧, 等. 农业政策调整下大豆种植格局变化对水土资源消耗的影响评估[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(6): 52-60. [Liu Hang, Shen Ge, Yang Jing, et al. Impact assessment of changes in soybean planting structure on water and farmland resources under agricultural policy adjustment[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(6): 52-60.]

[24] 关雪桦, 陈志和, 叶智恒. 中山市水资源系统动态模拟与敏感性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 103-111. [Guan Xuehua, Chen Zhihe, Ye Zhiheng. Dynamic simulation and sensitivity analysis of water resources system in Zhongshan City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 103-111.]

[25] 赵璧奎, 邱静, 李宁宁, 等. 基于系统动力学的城市社会经济干旱模拟与对策研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 63-69, 129. [Zhao Bikui, Qiu Jing, Li Ningning, et al. Urban socio-economic drought simulation and countermeasure study based on system dynamics[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 63-69, 129.]

[26] 卢方园, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 库布齐沙漠社会经济系统动态仿真及其应用[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1102-1111. [Lu Fangyuan, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. Dynamic simulation and carrying capacity analysis of a water resource system in Kubuqi Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1102-1111.]

[27] 陈文娟, 姚润锡, 石文豪, 等. 基于系统动力学模型的天津市水资源承载力模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(2): 42-51. [Chen Wenjuan, Yao Runxi, Shi Wenhao, et al. Simulation analysis of water resources carrying capacity in Tianjin based on system dynamics model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(2): 42-51.]

[28] 刘欢, 宋孝玉, 李磊, 等. 中国31省(市、自治区)水资源承载力评价及预测研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 226-237. [Liu Huan, Song Xiaoyu, Li Lei, et al. Evaluation and prediction of water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 226-237.]

[29] 苟娇娇, 缪驰远, 段青云. 水文模型参数敏感性分析—优化—区域化方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(7): 1338-1348. [Gou Jiaojiao, Miao Chiyuan, Duan Qingyun. Progress in parameter sensitivity analysis-optimization-regionalization methods for hydrological models[J]. Progress in Geography, 2022, 41(7): 1338-1348.]

[30] 肖洁, 温天福, 蔡付林, 等. 水资源刚性约束下新余市水资源承载力系统动力学仿真分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 62-71, 80. [Xiao Jie, Wen Tianfu, Cai Fulin, et al. System dynamics simulation analysis of water resources carrying capacity in Xinyu City under the rigid constraint of water resources[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(5): 62-71, 80.]

[31] 王翠, 杨广, 何新林, 等. 基于系统动力学的水资源承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 212-215, 220. [Wang Cui, Yang Guang, He Xinlin, et al. Study on water resources carrying capacity based on system dynamics[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 212-215, 220.]

Water resources supply and demand balance scheme of Bayannur City based on SD model

WANG Pingshun[1,2], ZANG Xuchao[3], HOU Fulai[1,2], TIAN Guoliang[1,2], LI Lu[1,2], HAN Xuemin[1,2], DONG Shaogang[1,2]

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China;
2. Key Laboratory of River and Lake Ecology of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China;
3. Inner Mongolia First Hydrogeological Engineering Geological Exploration Co., Ltd., Hohhot 010021, Inner Mongolia, China)

Abstract: With the development of the social economy, the contradiction between the supply and demand of urban water resources has become increasingly prominent. Exploring the balance between urban water resource supply and demand to achieve sustainable economic development has emerged as a critical issue in urban development planning. Based on the current state of local social development, four water resource supply-demand balance schemes (steady-state equilibrium, economic growth, efficient utilization, and comprehensive coordination) were designed using the system dynamics method. The supply and demand situation of water resources in Bayannur City, Inner Mongolia, China from 2016 to 2035 was analyzed. The simulation results indicate that: (1) If Bayannur City adopts the steady-state equilibrium or economic growth schemes, it will likely face a risk of water resource supply failing to meet demand during 2018—2027. (2) The efficient utilization and integrated coordination schemes can effectively mitigate this issue. (3) The comprehensive coordination scheme not only supports local economic development but also significantly reduces the water demand of agriculture, secondary industry, and tertiary industry, thereby alleviating the pressure on water supply and demand. This scheme can serve as the optimal approach for the future development and utilization of local water resources.

Key words: system dynamics; water supply and demand; water balance; Bayannur City